

التحكم بتدفق سائل التكييف والهواء الراجع لخفض استهلاك أنظمة التكييف المركزية من الطاقة الكهربائية

الدكتور قيس عبود*

احمد محمود علي**

(تاريخ الإيداع 31 / 1 / 2013. قُبِلَ للنشر في 5 / 6 / 2013)

▽ ملخص ▽

تعدّ إعادة استخدام الهواء الراجع في أنظمة التكييف المركزية من أهم الإجراءات الموفرة لاستهلاك الطاقة الكهربائية، إلا أن حاجة الأشخاص الموجودين ضمن الحيز المكيف للهواء النقي يفرض تحديد عدد مرات استخدامه. يهدف هذا البحث إلى ربط عمل نظام التكييف (التدفئة) لمنشأة ما بعد الأشخاص الموجودين ضمنها، وذلك عن طريق تعديل نسبة مزج الهواء الراجع والهواء الخارجي بهدف ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية، ورفع درجة حرارة المزيج الهوائي عن طريق التحكم بتدفق الماء الساخن بشكل مستمر، وليس بطريقة الفتح والإغلاق المتبعة سابقاً، وذلك بهدف الاستجابة لأي تغيير في عدد الأشخاص، والتخلص من الإقلاعات المتكررة للمعدات. تم إنجاز بحثنا باستخدام نموذج فيزيائي تم إعداده خصيصاً، مكون من غرفة اختبار وحساسات حرارة وحركة ومضخة وخزان ماء ومبادل حراري وشفرات خلط الهواء. تعمل هذه الأجهزة بقيادة متحكم PIC16F877A. أظهرت النتائج التي حصلنا عليها تجريبياً إمكانية التحكم بكمية الهواء الراجع تبعاً لعدد الأشخاص والتحكم بسرعة المضخة بشكل مستمر مع توفير في استهلاكها للطاقة الكهربائية يصل إلى 68% بالمقارنة مع حالة العمل عند السرعة الكاملة.

الكلمات المفتاحية: نظام تكييف مركزي، متحكم صغري، هواء راجع، مضخة، درجة الحرارة، المتحكم PID.

*أستاذ - قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
**طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Controlling the Flow of Conditioning Liquid and Return air to Reduce the Electrical Energy Consumption of HVAC Systems

Dr. Kais Aboud*
Ahmed Mhmood Ali**

(Received 31 / 1 / 2013. Accepted 5 / 6 / 2013)

▽ ABSTRACT ▽

The re-use of return air in central conditioning systems is one of the most important procedures for saving power consumption. However, the requested fresh air of the people existed within the conditioning space imposes determining the number of times to be used.

This research aims to link the work of the central conditioning system (heating) of a facility with the number of people existing within this facility by modifying the ratio of mixed fresh air and return air to save the electrical power consumption. Also, to raise the temperature of the mixture air by controlling the flow of hot water continuously rather than using on-off technique. As well as, to respond to any change in the number of people and get rid of repeated machine starting.

Our research has been done by using specialized physical model consisted of test room, heat and movement sensors, pump, water tank, heat exchanger and air mixing blades. These devices are controlled by microcontroller type PIC16F877A.

The experimentally obtained results showed the ability of controlling the amount of return air depending on the number of people and controlling the speed of the pump continuously providing a saving of electrical energy consumption up to 68% compared with the case of full speed.

Keywords: Heating, Ventilating, and Air-Conditioning (HVAC), microprocessor controller, return air, pump, temperature, PID controller.

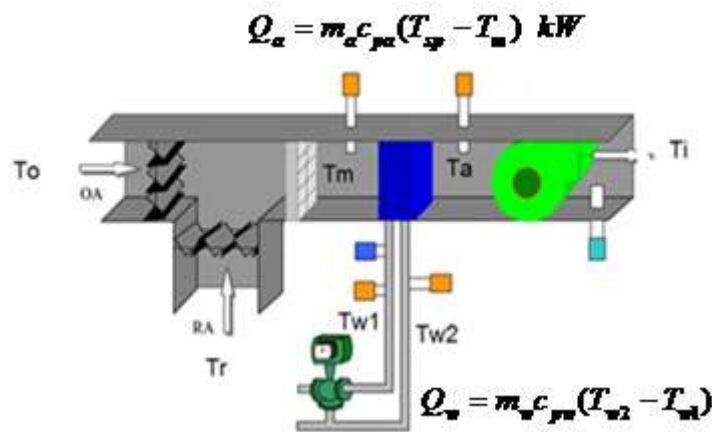
*Professor, Department of Electric power, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Syria.

**Postgraduate Student, Department of Electric power, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Syria.

مقدمة:

تعد أنظمة التكييف المركزية (HVAC Heating Ventilating and Air-Conditioning) من أكثر الأنظمة انتشاراً واستهلاكاً للطاقة الكهربائية، وقد أصبحت حاجة ضرورية في أي منشأة. تحتوي هذه الأنظمة على العديد من التجهيزات والمعدات الكهربائية والميكانيكية التي يجب قيادتها والتحكم بها لبلوغ درجة حرارة التكييف المطلوبة مع مراعاة كفاءة استخدام الطاقة الكهربائية.

يعتمد مبدأ عمل نظام التكييف المبين على الشكل (1) على مزج الهواء الطلق (Outside-Air(OA)، والهواء العائد من الغرف (Return-Air(RA) ومن ثم تمرير الهواء الممزوج عبر المبادل الحراري. يتم تغيير معدل تدفق الماء المار عبر المبادل الحراري باستخدام (صمام ومحرك ومتحكم). تضبط درجة حرارة مزيج الهواء الداخل لملاحقة درجة الحرارة المرجعية من خلال تنظيم وضعية الصمام والذي يغير معدل تدفق الماء الداخل إلى المبادل الحراري [3].



الشكل (1) نظام التحكم بدرجة حرارة هواء التكييف

حيث:

- Q_a (Kw): كمية الطاقة الحرارية التي يكتسبها الهواء.
- Q_w (Kw): كمية الطاقة الحرارية التي يخسرها الماء.
- m_a (kg/s): كتلة الهواء الممزوج المتدفق في الثانية.
- m_w (kg/s): كتلة الماء المتدفق عبر المبادل في الثانية.
- C_{pa} (kJ/kg.K): الحرارة النوعية للهواء وتساوي 1.006.
- T_o (°C): درجة حرارة الهواء الخارجي OA.
- C_{pw} (kJ/kg.K): الحرارة النوعية للماء وتساوي 4.18.
- T_i (°C): درجة حرارة الهواء داخل الحيز المكيف.
- T_{sp} (°C): درجة الحرارة المطلوبة الواجب بلوغها.
- T_m (°C): درجة حرارة الهواء قبل المبادل الحراري.
- T_{w1} (°C): درجة حرارة الماء الداخل إلى المبادل.
- T_{w2} (°C): درجة حرارة الماء الخارج من المبادل.
- T_r (°C): درجة حرارة الهواء الراجع RA.

على الرغم من أهمية إعادة استخدام الهواء الراجع في توفير الطاقة الكهربائية، إلا أن ذلك لا يتم بشكل اعتباطي بسبب تأثيره المباشر على راحة الأشخاص الموجودين واحتياجهم المستمر للأوكسجين الذي يوفره لهم الهواء الخارجي النقي. كما أن مزج هاتين الكميتين من الهواء يحتاج إلى تدفق معين للماء الساخن عبر المبادل الحراري ليتم رفع درجة حرارة هذا المزيج إلى درجة الحرارة المرغوبة من قبل المستثمرين.

كمية الطاقة الحرارية اللازمة لرفع درجة حرارة المزيج الهوائي من الدرجة T_m إلى درجة الحرارة المطلوبة T_{SP} هي:

$$Q_a = m_a c_{pa} (T_{sp} - T_m) \text{ kW} \quad (1)$$

باعتبار تحول الطاقة الكهربائية المصروفة Q_e من قبل النظام إلى طاقة حرارية لرفع درجة حرارة هواء التكييف:

$$Q_e = A Q_a \text{ kW} \quad (2)$$

حيث أن A عامل تناسب يأخذ بالحسبان وجود ضياع حراري في وشائع التسخين وتحولات الطاقة الحرارية. الطاقة الكهربائية المصروفة على عمل مضخة التكييف وتدفق سائل التكييف تعطى بالعلاقة (3) [14]:

$$P = kn^3 \text{ W} \quad (3)$$

$P(W)$: الطاقة الكهربائية المصروفة. $n(\text{rpm})$: سرعة المضخة. $k(\text{m}^3/\text{h})$: تدفق الماء بالمتر المكعب في الساعة.

بالتالي عند استخدام تقنية الهواء الراجع ينخفض الفرق الحراري $(T_{sp} - T_m)$ وفق العلاقة (1) ومنه ينخفض استهلاك النظام من الطاقة الكهربائية بنفس النسبة حسب العلاقة (2). من جهة ثانية وانطلاقاً من العلاقة (3) فإن عمل النظام بطريقة التحكم المستمر بسرعة المضخة من شأنه أن يخفض استهلاك النظام للاستطاعة الكهربائية من 3 إلى 4 أضعاف فيما لو تم العمل بطاقتها العظمى.

تعمل جميع أنظمة التكييف المركزية على تزويد الأمكنة المكيفة بكمية مناسبة من الهواء بدرجة الحرارة المطلوبة، وقد تطور بناء هذه الأنظمة تدريجياً في السنوات العشر الأخيرة، حيث اقترح Restrepo تنظيم عملية الفصل والوصل (on, off) لصمامات التكييف بغية تحقيق التوافق فيما بينها [1]. طبقت إجراءات تحجيم أوتوماتيكية لمكونات النظام باستخدام أدوات SIMBAD من قبل Riederer لكن أنموذجه لم يأخذ بالحسبان وجود مضخات متغيرة السرعة أو استهلاك النظام للطاقة الكهربائية [2]. اتبعت طريقة لتتبع درجة الحرارة باستخدام معادلات الـ PID المزودة بشبكة عصبونية من قبل Zaheer-uddin تعتمد على تمثيل النظام على شكل single-input, single-output (SISO) (وحيد الدخل ووحيد الخرج) مع اعتبار درجة حرارة دخول الماء T_{wi} كتشويش على النظام [3]. تم تمثيل أنظمة التكييف على شكل multiple-input, multiple-output (MIMO) (متعدد المدخل والمخارج) من قبل Anderson حيث تبين انه أسرع من نظام SISO إلا انه يتطلب مزودات ماء منفصلة لكل نظام تفريغ هوائي (DAS) discharge air system وهذا ما يزيد من التكلفة التصميمية للنظام [4]. جرت اختبارات لأداء أنظمة التكييف باستخدام الـ MATLAB/SIMULINK لمدينتين برازيليتين من قبل Novak لتحليل أداء السلوك الحراري وتحكم الحلقة المغلقة لأنظمة HVAC، تناول أنموذجه النظام من حيث معادلات فضاء الحالة غير الخطية التي تمثل توازن الطاقة والكتلة من أجل كل مكون من مكونات HVAC [5]. صُمم أنموذج رياضي لعمل صمامات التكييف من قبل Liang وفقاً لمعادلات كمية الحرارة والترموديناميك الحراري [6]. ثم قام Rogerio ببناء خوارزمية حسابية عامة لنظام تكييف متعدد المناطق بالاعتماد على الحساب الآتي لدرجات الحرارة [7]. صُمم نظام تكييف خبير باستخدام المتحكم العشوائي من نمط PID ذاتي التوليف، حيث نفذت النمذجة والمحاكاة الرقمية والتحكم الضبابي Fuzzy control لنظام التكييف مع الأخذ بالحسبان درجة حرارة الوسط المحيط، تم الحصول على النماذج باشتقاق معادلات تحويل الحرارة بالنسبة للفقد الحراري [8]. تمت دراسة نظام HVAC للتنبؤ بأداء مبادلات التكييف عند تغير معدلات تدفق الهواء والماء المار عبر هذه المبادلات [9]. ضبطت درجة حرارة التكييف المطلوبة باستخدام مبادل

حراري واحد ومروحتين مع وجود إعادة استخدام الهواء RA إلا أن إعادة الاستخدام لم يربط بعدد الشاغلين للحيز المكيف [10]. تم التحكم بالنظام باستخدام طريقة PID-cascade. للتغلب على الاضطرابات التي تظهر عند وجود استجابة خاطئة [11]. وقد اقترح Kelman أنموذجاً لنظام تكييف بالاعتماد على وجود مبادلين حراريين الأول في المجرى الرئيس للهواء والثاني مؤلف من عدة مبادلات حرارية كل منها على مدخل منطقة من مناطق التكييف المتعددة. قام بالتحكم بشفرات إعادة استخدام الهواء الراجع من جميع هذه المناطق وهذا من شأنه أن يزيد تكلفة بناء النظام من جهة ولم يراع انشغال النظام بالأشخاص من جهة ثانية [12]. مشاكل التداخل بين بارامترات التحكم تمت معالجتها بتمثيل نظام التكييف بشكل MIMO وفك الربط بين بارامتر التحكم وعملية النظام، ثم التحكم في درجة حرارة هواء الغرفة [13].

يلاحظ من جميع الدراسات السابقة لأنظمة HVAC سواء اعتبرت النظام على شكل SISO أو MIMO أنها لم تأخذ بالحسبان عدد الأشخاص P كدخل أثناء التحكم بالنظام ولا زاوية ميل شفرات مزج الهواء α كخرج له، كذلك لم يتم ربط تدفق سائل التكييف بدرجة حرارة الحيز المكيف ودرجة الحرارة المرغوبة بشكل مستمر. لقد اعتبرنا في هذا البحث أن نظام التكييف على شكل نظام MIMO مدخلاته هي درجة حرارة الغرفة وعدد الأشخاص الموجودين في الحيز المكيف. ومخرجاته هي درجة حرارة التكييف وسرعة المضخة وزاوية ميل الشفرات وذلك بوجود مبادل واحد ومروحة واحدة بهدف تلبية احتياجات المستثمرين من الهواء المكيف بدرجة الحرارة المطلوبة مع ترشيد في استهلاك نظام التكييف من الطاقة الكهربائية.

أهمية البحث وأهدافه:

- يكتسب البحث أهميته من كونه يندرج ضمن محاور بحثية لها أهمية على مستوى العالم، تهدف إلى تقديم الخدمات الضرورية ومنها التكييف بأقل استهلاك للطاقة الكهربائية.
- انطلاقاً من المشكلات الرئيسة التي لوحظت في أنظمة التكييف المركزية فإن البحث يهدف إلى مايلي:
1. دراسة إمكانية الربط بين نظام التكييف المركزي لمنشأة وعدد الأشخاص الموجودين ضمن هذه المنشأة ومدى مساهمة ذلك الربط في خفض استهلاك النظام للطاقة الكهربائية.
 2. دراسة إمكانية استبدال تقنية التحكم المتقطع (إغلاق، فتح) أو (0,1) ذات الإقلاع المتكرر بتقنية التحكم المستمر بين 0 و 1 ومدى تأثير ذلك على استهلاك النظام من الطاقة الكهربائية.
 3. دراسة إمكانية مزج الهواء الراجع مع الهواء النقي بنسب متوافقة مع مشغولية الحيز المكيف بالأشخاص.

طرائق البحث ومواده:

يقوم النظام بمحاكاة عملية التدفئة على غرفة صغيرة باستخدام مبادل حراري يعمل على الماء الساخن ومضخة يمكن التحكم بسرعتها بحيث يمكن التحكم بتدفق الماء الذي يعبر المبادل في وحدة الزمن. يتم استخدام الهواء الراجع لتدفئة الغرفة وذلك عن طريق فتح شفرات وإغلاق أخرى لإحداث نوع من التوازن بين الهواء الراجع والهواء الجديد بناءً على عدد الأشخاص. تم بناء هذا الأنموذج المقترح وفقاً للاعتبارات التالية:

1. الاعتبارات الميكانيكية:

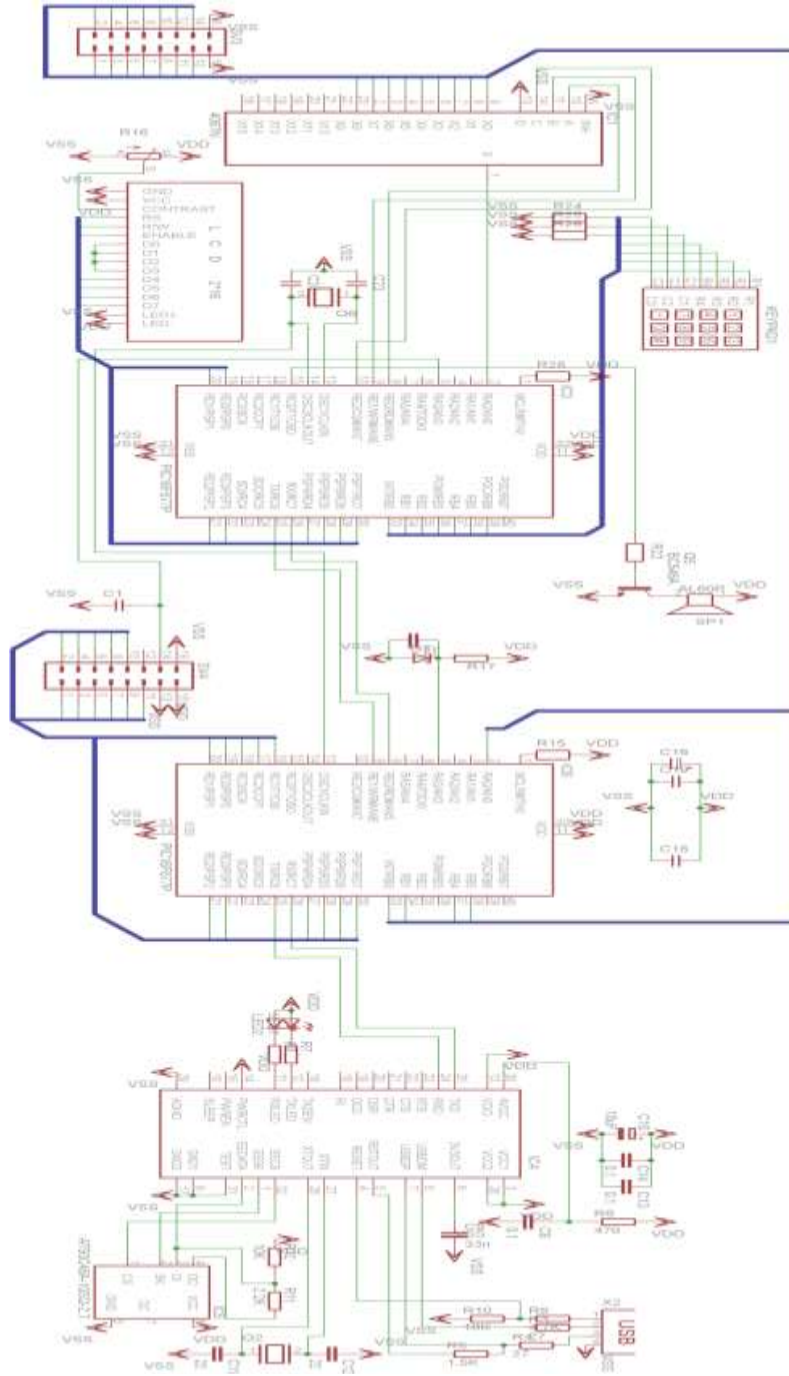
- تم بناء النظام المقترح من وجهة النظر الميكانيكية انطلاقاً من الحسابات التالية:
- إن تصميم أنموذج غرفة معزولة تماماً مع مجاري هواء راجع وجديد ومشع حراري هو أمر صعب ومكلف. لذلك تم إجراء التجربة على غرفة مصغرة وممرات هوائية مصنوعة من مادة الفير الشفاف (زجاج بلاستيكي).
 - يجب أن يحتوي النظام الميكانيكي على غرفة وممر هواء راجع وممر هواء جديد.
 - إن التحكم بكمية الهواء المتدفق عبر ممر ما يجب أن يتم عن طريق شفرات يمكن تدويرها بالزاوية المرغوبة، وهذا يتطلب محرك سيرفو أو خطوي أو محرك تيار مستمر مع مقياس زاوية، لذلك استخدمنا هنا محركين، الأول يثبت على شفرات الهواء الراجع والثاني يثبت على شفرات الهواء الجديد.
 - من المؤكد أن صنع أنموذج غرفة مصغرة لا يمكن أن ينسجم مع المبادلات الحرارية الموجودة في الأسواق، لذلك سنقوم باستخدام أنبوب نحاسي ملفوف بشكل حلزوني كمبادل حراري.
 - استخدمنا مضخة صغيرة قابلة للتحكم بسرعتها لتأمين تدفق سائل التكييف عبر المبادل الحراري.

2. الاعتبارات الإلكترونية:

إن تحقيق النظام السابق يتطلب إلكترونياً الأمور التالية:

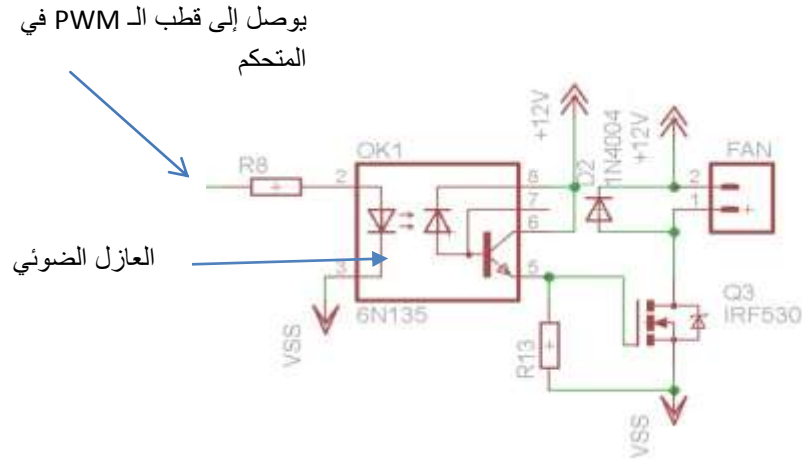
- 1- قياس ثماني درجات حرارة وهي: درجات حرارة الهواء الجديد والهواء الراجع والهواء الممزوج قبل المبادل والهواء بعد المبادل والغرفة وخزان الماء والماء الداخل إلى المبادل والخارج من المبادل؛
- 2- عد الأشخاص في الغرفة (دخول، خروج)؛
- 3- معرفة الزوايا الصفوية للشفرات؛
- 4- قيادة محركي خطوة (محركات الشفرات)؛
- 5- قيادة مضخة مع تحكم بالسرعة؛
- 6- شاشة إظهار لعرض مختلف القيم المطلوبة؛
- 7- لوحة مفاتيح لإدخال البارومتري المطلوبة؛
- 8- متحكم صغري مناسب لقيادة هذه الفعاليات.

لبناء الأنموذج المقترح احتجنا إلى 37 قطباً، وهو أمر غير متوافر في متحكمات شركة Microchip إلا في العائلات 18F وما فوق. ومتحكمات هذه العائلة غير متوافرة كلها في الأسواق هذا بغض النظر عن صعوبة التعامل معها فنياً من حيث اللحام والفك والتركيب. لذلك قررنا استخدام متحكمين صغريين من نوع 16f877a يقسم العمل على كل منهما ويتصلان معاً بوساطة بروتوكول اتصال تسلسلي مناسب كما هو واضح في الشكل (2).



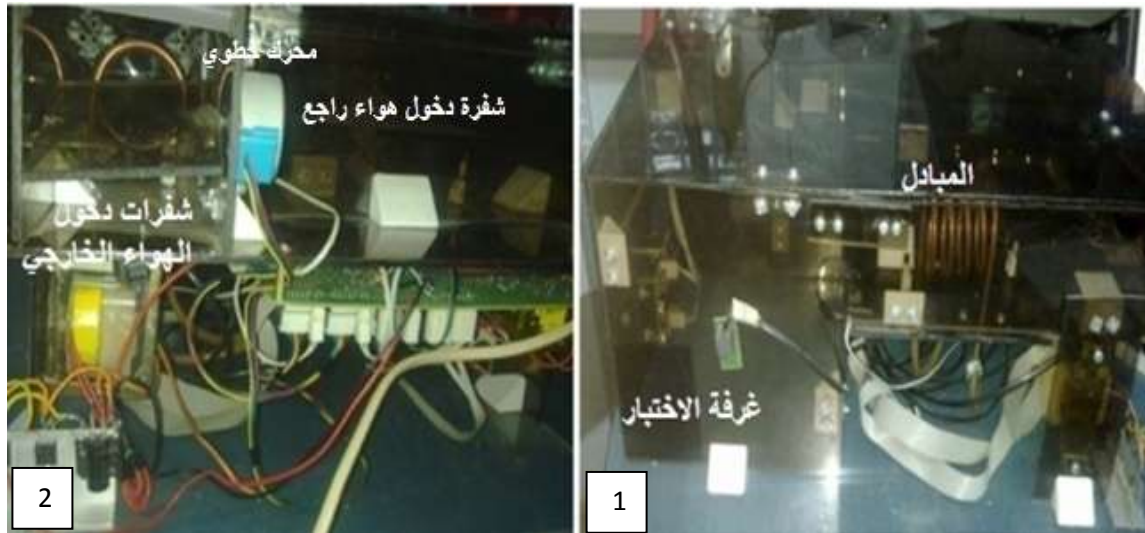
الشكل (2) لوحة القيادة - المخطط الكهربائي

تحتوي أغلب متحكمات PIC وحدات تعديل عرض النبضة Pulse Width Modulation (PWM) حيث المتحكم 16f877a يمتلك اثنتين منها، وهذا من أهم عوامل اختيارنا له، لأننا نحتاج تحكماً بسرعة محركين DC. وهما محركا المضخة والمروحة. بالتالي علينا وصل أقطاب وحدتي PWM من المتحكم إلى الترانزستورات المربوطة مع هذه المحركات. يبين الشكل (3) مخطط دائرة القيادة المستخدمة.



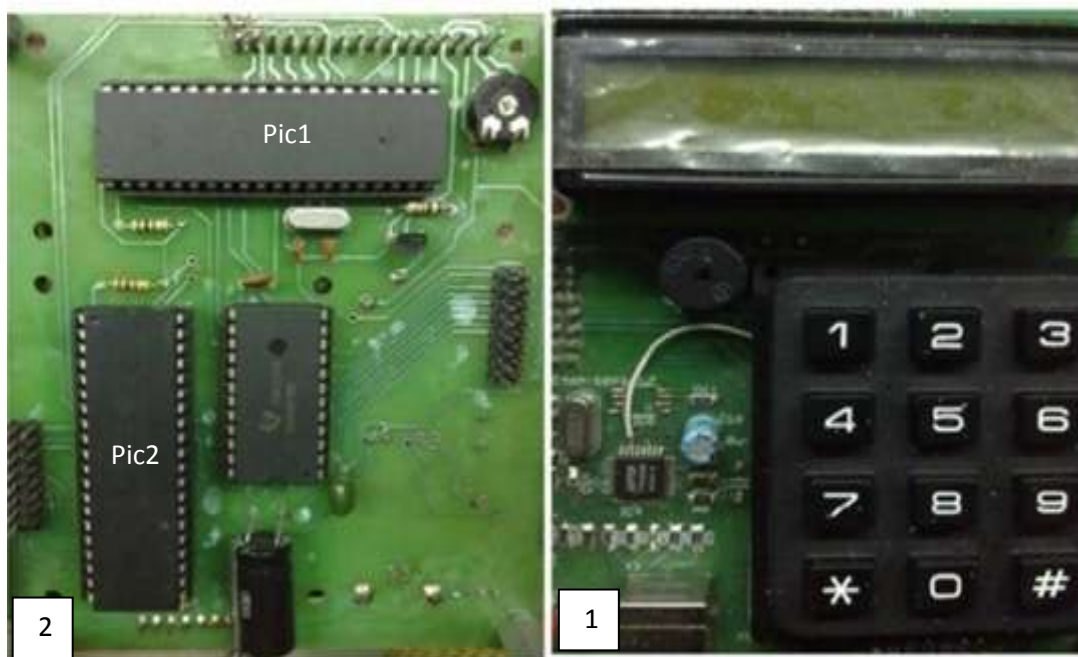
الشكل (3) وصل أقطاب PWM من المتحكم إلى الترانزستور

إن استخدام العازل الضوئي المبين في الشكل (3) في نقل الإشارة يساهم في التخفيف من أثار التشويش التي تنتج عن التحكم بالسرعة عن طريق عرض النبضة.



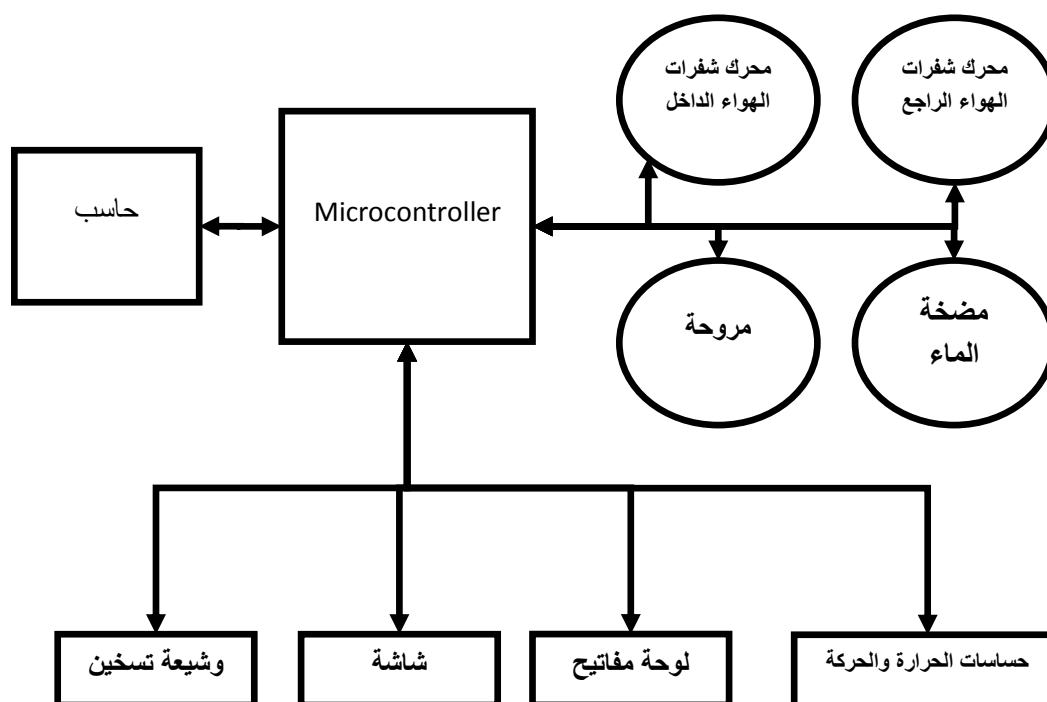
الشكل (4) أنموذج نظام HVAC العملي المقترح

يبين الشكل (4) الأنموذج العملي المقترح، حيث يظهر الشكل (1.4) الشكل العام لنظام HVAC الذي تم تنفيذه بطول 51cm وعرض 31cm، يظهر المبادل الحراري المصنوع من قضيب نحاسي ملفوف 5 لفات وطوله الإجمالي 50cm باللون الأصفر. تتوافر غرفة الاختبار على يسار المبادل الحراري، يوجد في مقدمتها بابان يثبت عليهما حساسا حركة يعملان على الأشعة تحت الحمراء ويتلخص عملهما بإرسال موجة أشعة تحت حمراء منقطعة بتردد 38 كيلو هرتز تصطدم بالشخص فيرتد جزء منها إلى مستقبل للأشعة مولف على التردد 38 كيلو هرتز، أحدهما لعد الأشخاص الداخلين إلى الغرفة والآخر لعد الأشخاص الخارجين منها. وعلى يمين المبادل الحراري تتوضع شفرات دخول الهواء الخارجي النقي كما في الشكل (2.4)، يقود هذه الشفرات محرك خطوي صغير. ويوجد على يمينه شفرات الهواء الراجع وتتوضع أسفله مأخذ ربط معدات النظام مع دائرة التغذية. تظهر لوحة المفاتيح والشاشة في الشكل (1.5)، بينما يبين الشكل (2.5) توضع المتحكمين ومربطيهما مع النظام.



الشكل (5) وحدات الإدخال والايخراج ولوحة القيادة

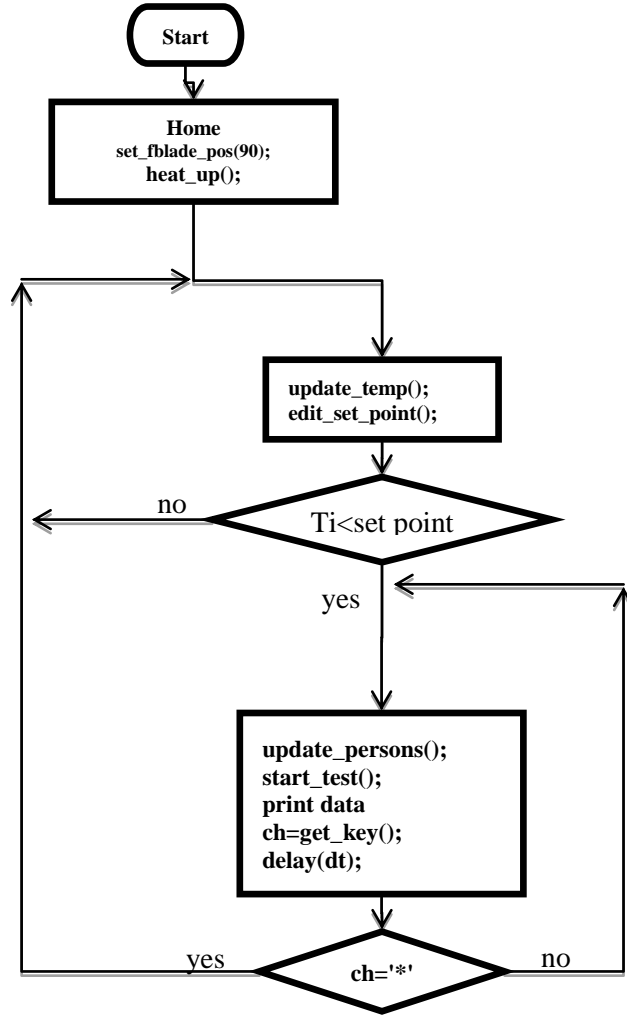
يبين الشكل (6) المخطط الصندوقي للنظام ككل.



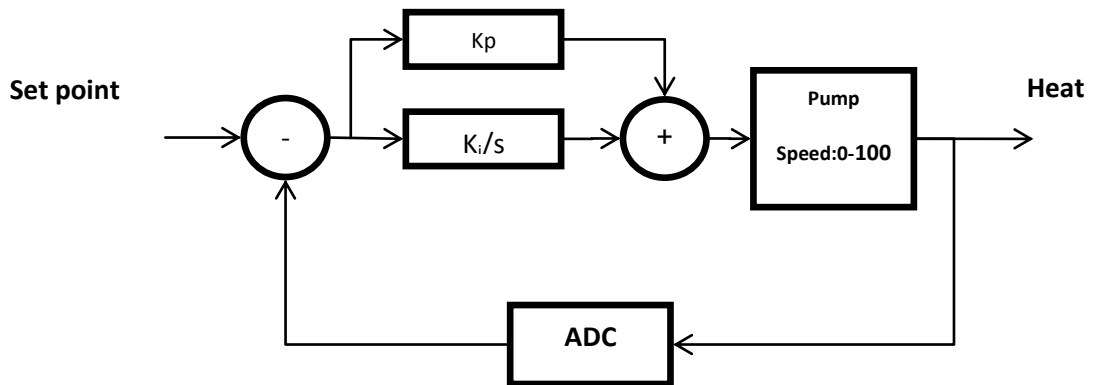
الشكل (6) المخطط الصندوقي لنظام التحكم بالأنموذج المقترح

3. البرنامج الرئيس

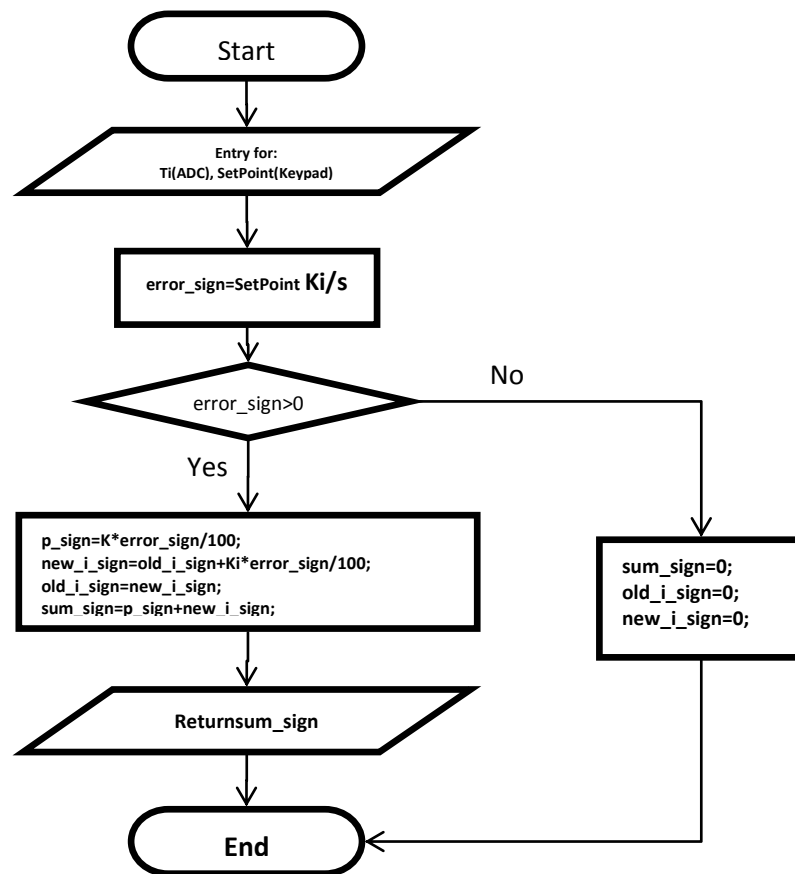
يقوم البرنامج الرئيس للتحكم باستدعاء التتابع بالترتيب الذي يظهره المخطط المبين في الشكل (6).



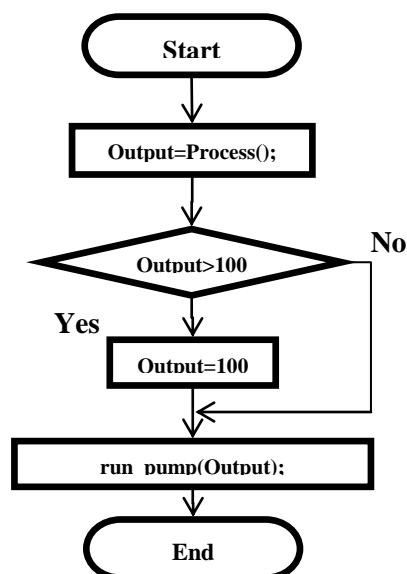
الشكل (7) المخطط التدفقي للبرنامج الرئيسي للتحكم



الشكل (8) المخطط الصندوقي للتحكم PI (K_i=1, K_p=1)



الشكل (9) المخطط الصندوقي للتابع Process



الشكل (10) المخطط الصندوقي للتابع Start_test

4. آلية عمل الأنموذج المقترح:

عند تشغيل النظام يقوم المتحكم بتصفير الزوايا الخاصة بشفرات الهواء الراجع والهواء الخارجي، ثم يغلق شفرات الهواء الخارجي على الزاوية 90 مانعاً بذلك دخول أي هواء خارجي جديد إلى دائرة التدفئة. يقوم المتحكم بوصل ملف التسخين رافعاً درجة حرارة الماء في الخزان إلى 60 درجة مئوية، يقوم المعالج بإطفاء الملف وبدء العمل حسب الخوارزمية الموجودة في الشكل (7). عندئذ يظهر المتحكم رسالة على الشاشة مفادها طلب إدخال درجة الحرارة المرجعية المرغوبة من قبل المستخدم عبر لوحة المفاتيح، وبعد الإدخال يبدأ المتحكم عملية رفع درجة حرارة الغرفة عبر الخطوات التالية:

- 1- يقرأ درجات الحرارة القادمة من حساسات الحرارة وعدد الأشخاص.
- 2- يقوم بمقارنة درجة حرارة الغرفة بالحرارة المرجعية.
- 3- يحدد الفرق بين درجة حرارة الغرفة ودرجة الحرارة المرجعية كإشارة خطأ ترسل إلى المتحكم البرمجي PI المبين في الشكل (8) لمعالجتها، ويؤثر بنتيجتها على زوايا ميل الشفرات وسرعة المضخة محركاً الماء الساخن عبر المبادل لرفع درجة حرارة الغرفة.
- 4- يقرأ حالة لوحة المفاتيح، فإذا ضغط المستخدم زر * يتم الخروج من الخطوات السابقة وطلب تحديث درجة الحرارة المرجعية.

يقوم هذا النظام بالتحكم بدرجة حرارة الغرفة بطريقة تكاملية تناسبية، حيث تتم قراءة درجة حرارة الغرفة وتحويلها إلى قيمة رقمية عن طريق المحول ADC كما هو مبين في الشكل (8)، وتتم مقارنة خرج المعدل التشابهي الرقمي بالقيمة المرجعية وناتج الطرح يعتبر إشارة الخطأ التي سيتم مكاملتها وضربها بمعاملات التناسب (الريح التناسبي والتكاملي K_p, K_i). ناتج الجمع يمثل قيمة السرعة التي يجب أن تعمل عندها المضخة وينفذ ذلك التابع $Process$ المبين في الشكل (9). يتم تطبيق القيمة الناتجة عن التكامل والتناسب على سرعة المضخة بعد تحديدها بين القيمتين 0% و 100% وبذلك يبدأ تدفق الماء الساخن ضمن المشع معدلاً درجة حرارة الغرفة ودافعاً بها إلى قيمة قريبة من القيمة المرجعية حيث يقوم التابع $Start Test$ المبين في الشكل (10) بهذه الخطوات.

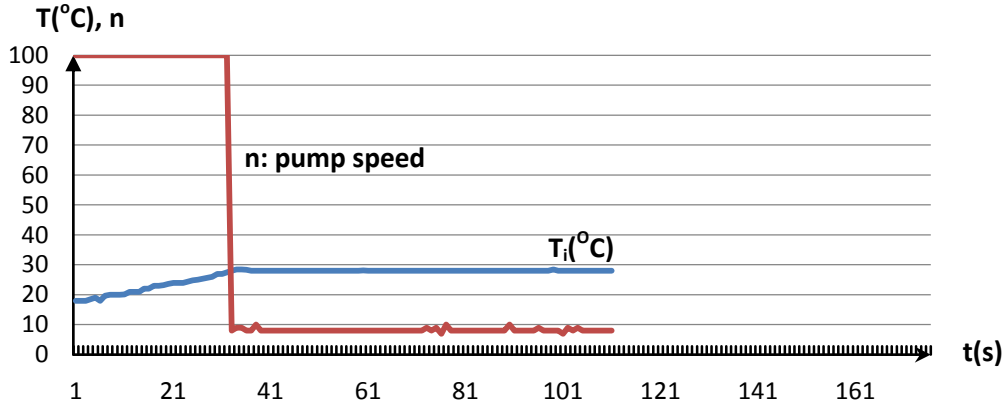
النتائج والمناقشة:

باختبار الأنموذج وتشغيله تبين أنه يمكن للمضخة أن تعمل بأية سرعة مطلوبة بين 0% و 100% من سرعتها الاسمية لتلبية احتياجات النظام وليس فقط حالة (on, off) المتبعة في الأنظمة التقليدية. وهذا ما يلغي مشكلة الإقلاعات المتكررة للنظام من جهة، وضبط درجة الحرارة المطلوبة من جهة أخرى.

عند تلقي النظام إشارة بضرورة رفع درجة الحرارة إلى الدرجة 28 (على سبيل المثال) والتي يتم إدخالها عبر لوحة المفاتيح، يبدأ النظام بالعمل لبلوغ هذه الدرجة حيث نلاحظ أن درجة حرارة الغرفة بدأت بالارتفاع من 18°C (درجة حرارة الوسط الخارجي) حتى 28°C كما في الشكل (11) وذلك بوجود شخص واحد في غرفة الاختبار. كما أن المضخة عملت عند سرعة 100% من سرعتها الاسمية ثم انخفضت لتعمل عند سرعة 8% من سرعتها الاسمية مع المحافظة على ضبط درجة الحرارة والاقتصار على تعويض الفقد الحراري فقط. هذا من شأنه أن يخفض استهلاك النظام للطاقة الكهربائية بمقدار 99% في حالة وجود شخص واحد بالمقارنة مع عمل المضخة عند سرعة 100% من سرعتها الاسمية كما هو واضح من العلاقة (3).

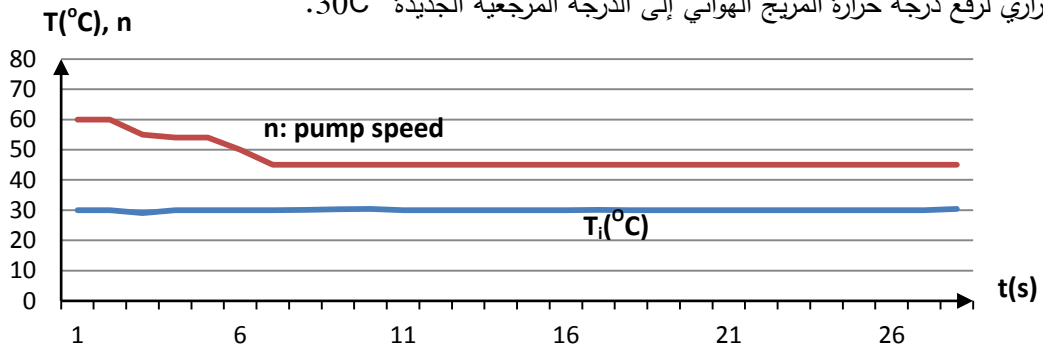
$$n=100\%, k=100\%, P=(100\%)(100\%)^3=1 \text{ pu.}$$

$$n=8\%, k=8\%, P=(8\%)(8\%)^3=41.10^{-6} \text{ pu.}$$



الشكل (11) سرعة المضخة من اجل شخص واحد و درجة الحرارة 28

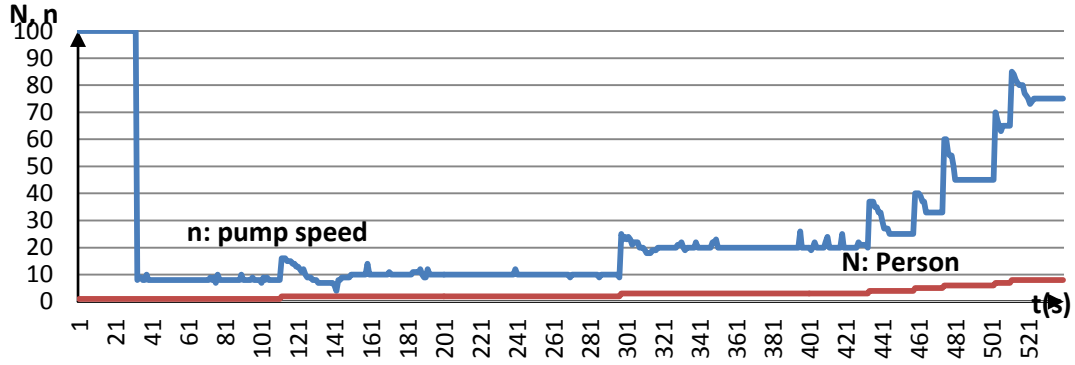
عند إمرار اليد لتدخل من باب غرفة الاختبار خمس مرات إضافية، يتحسس النظام لوجود 6 أشخاص، فنقوم المحركات الخطوية بفتح ممرات دخول الهواء الخارجي بستة أضعاف ما كانت عليه في الحالة السابقة، وإغلاق ممرات الهواء الراجع بنفس النسبة. وبالتالي تزداد نسبة الهواء البارد الخارجي الممزوج مع الهواء الراجع، فتتخفص درجة حرارة المزيج الهوائي الموجود قبل المبادل الحراري. وهذا يتطلب زيادة سرعة المضخة لزيادة تدفق الماء الساخن عبر المبادل الحراري لرفع درجة حرارة المزيج الهوائي إلى الدرجة المرجعية الجديدة 30°C .



الشكل (12) سرعة المضخة من اجل 6 أشخاص ودرجة حرارة 30

يبين الشكل (12) أنه بدخول أشخاص آخرين إلى الغرفة وتعديل نسبة مزج الهواء فإن المضخة استجابت لذلك بالعمل عند 45% فقط من سرعتها الاسمية مع توفير في استهلاك الطاقة بحدود 95%.

$$n=45\%, k=45\%, P=(45\%)(45\%)^3=0.041 \text{ pu.}$$

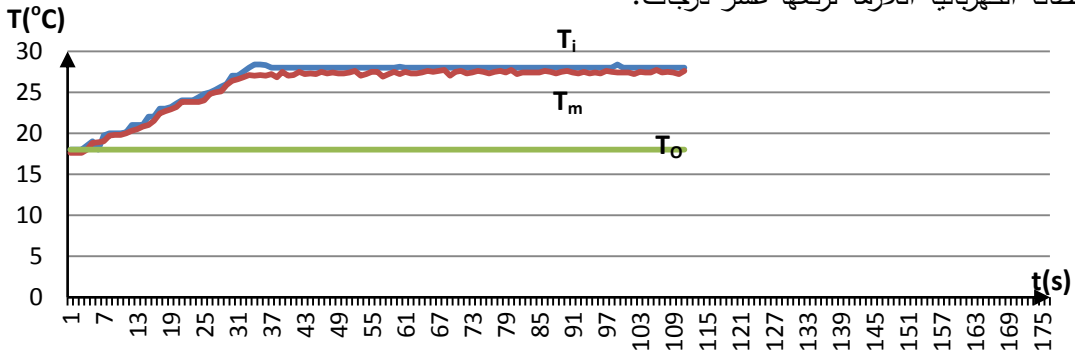


الشكل (13) يبين تغير سرعة المضخة تبعاً لعدد الأشخاص

يبين الشكل (13) أن النظام يستجيب لأي تغيير في عدد الأشخاص، عن طريق تقديم هواء إضافي خارجي مع دخول كل شخص جديد وزيادة سرعة المضخة لزيادة معدل تدفق سائل التكييف عبر المبادل. يشير الشكل (13) إلى أن سرعة المضخة تغيرت بنسبة 8% لتصل إلى 75% عند تغير عدد الأشخاص من 1 إلى 9 أشخاص بتوفير 68% من استهلاكها للطاقة الكهربائية.

$$n=75\%, k=75\%, P=(75\%)(75\%)^3=0.32 \text{ pu}$$

هذا الضبط الآلي لدرجة الحرارة وشفرات مزج الهواء يؤدي إلى التوفير في استهلاك الطاقة الكهربائية اللازمة لعمل أنظمة HVAC. حيث يبين الشكل (14) أن درجة حرارة مزيج الهواء بالنسبة لمشغولية الحيز المكيف بشخص واحد هي 27°C ودرجة الحرارة المطلوبة هي 28°C . مما يعني أن النظام يحتاج لرفع درجة حرارة الهواء درجة واحدة فقط لبلوغ هدفه، بينما يحتاج إلى رفع درجة الحرارة من 18 إلى 28 بدون إعادة استخدام الهواء الراجع من جديد، وبالتالي استهلاك طاقة كهربائية أقل حيث إن الطاقة الكهربائية اللازمة لرفع درجة حرارة الهواء بمقدار درجة واحدة أقل من الطاقة الكهربائية اللازمة لرفعها عشر درجات.



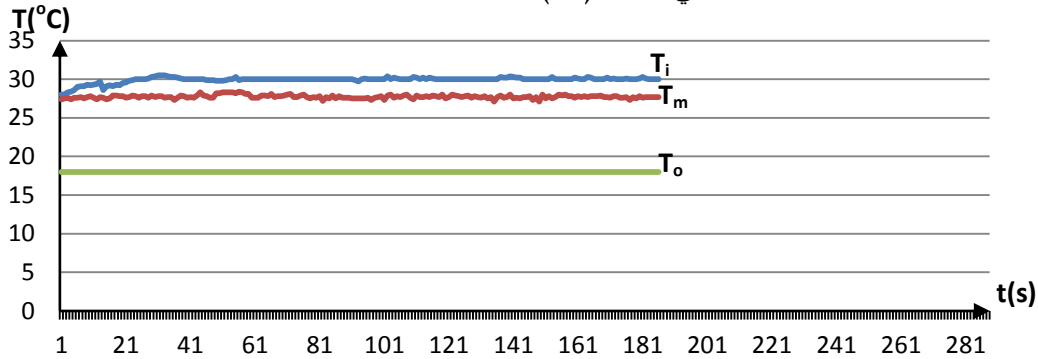
الشكل (14) درجة حرارة مزيج الهواء بوجود شخص واحد

بدون وجود الهواء الراجع فإن: $T_{sp}=28, T_m=T_o=18, Q_e=Am_a c_{pa}(28-18)=10Am_a c_{pa} \text{ [pu]}$.

مع وجود هواء راجع تصبح حرارة مزيج الهواء 27 وبالتالي: $Q_e=Am_a c_{pa}(28-27)=1Am_a c_{pa} \text{ [pu]}$.

مما يعني توفيراً في استهلاك الطاقة الكهربائية 90% مما هو عليه دون وجود هواء راجع.

مع ازدياد مشغولية الحيز المكيف بأشخاص جدد تتخفص نسبة الهواء الراجع ويترافق ذلك مع انخفاض درجة حرارة مزيج الهواء، وبالتالي ازدياد الفرق بين درجة حرارة الهواء قبل المبادل ودرجة الحرارة المطلوبة لتصل إلى 3 درجات من أجل شخصين كما هو مبين في الشكل (15).



الشكل (15) درجة حرارة مزيج الهواء بالنسبة لشخصين

بدون وجود الهواء الراجع فإن: $T_{sp}=28$, $T_m=T_o=18$, $Q_e=Am_a c_{pa}(30-18)=12Am_a c_{pa}$ [pu].
مع وجود هواء راجع تصبح حرارة مزيج الهواء 27 وبالتالي: $Q_e=Am_a c_{pa}(30-27)=3Am_a c_{pa}$ [pu].
مما يعني توفيراً في استهلاك الطاقة الكهربائية 75% مما هو عليه دون وجود هواء راجع.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- 1- تم التحقق من صلاحية الأنموذج الفيزيائي المقترح لنظام التكييف والتحكم به بشروط مختلفة، حيث تمكن النظام من تحسس عدد الأشخاص وتعديل فتح شفرات مزج الهواء.
- 2- أثبتت الدراسة إمكانية ربط عمل نظام التكييف واستهلاكه للقدرة الكهربائية بعدد الأشخاص الموجودين في الحيز المكيف.
- 3- أثبتت الدراسة إمكانية استبدال تقنية التحكم المتقطع (on, off) بتقنية التحكم المستمر مع توفير في استهلاك الطاقة الكهربائية بنسب معتبرة.
- 4- أثبتت الدراسة إمكانية مزج الهواء الراجع مع النقي بنسب متوافقة مع مشغولية الحيز المكيف بالأشخاص.

التوصيات:

- 1- نوصي باستخدام هذا الحل في أنظمة التكييف المركزية لما له من دور في تحسين أداء النظام وتمكين نظام التكييف من التلاؤم مع عدد الأشخاص الموجودين ومن تعديل مزج الهواء الراجع مع الهواء الخارجي.
- 2- نوصي بمتابعة البحث مع الأخذ بالحسبان منشأة متعددة المناطق وذلك بوجود آلية للتحكم بمزج الهواء وفق كل منطقة على حده.
- 3- نوصي بمتابعة البحث مع اعتبار T_{w1} كدخل للنظام وغير ثابتة طيلة فترة عمل النظام.

المراجع:

- [1] RESTREPO, A.; GONZÁLEZ, A.; ORDUZ, S. *Cost effective control strategy for small applications and pilot plants: on-off valves with temporized PID controller*. Chemical Engineering Journal, 2002, pp.101-107.
- [2] Riederer, P. *From sizing and hydraulic balancing to control using the simbad toolbox*. Eighth International IBPSA Conference, 2003, pp.1101-1108.
- [3] ZAHEER, M.; TUDOROIU, N.; *Neuron-PID tracking control of a discharge air temperature system*. Science Direct, Canada, 2004, pp.2405-2415.
- [4] ANDERSON, M.; et al.; *MIMO robust control for heating, ventilating and air conditioning (HVAC) Systems*. IEEE trans. Cont. Syst. Tech., 2005, pp.101-116.
- [5] NOVAK, P. R.; MENDES, N.; GUSTAVO, H. C.; *simulation of hvac plants in 2 Brazilian cities using Matlab/Simulink*. Ninth Inter. IBPSA Conf. 2005, pp.859-866.
- [6] LIANG, J.; Du, R.; *Model-based fault detection and diagnosis of hvac systems using support vector machine method*. Science Direct. International Journal of Refrigeration. 2007, pp.1104-1114.
- [7] BARBOSA, R.M.; MENDES, N. *Combined simulation of central HVAC systems with a whole-building hydrothermal model*. Science Direct. 2008, pp.276-288.
- [8] SOYGUDER, S.; KARAKOSE, M.; ALLI, H.; *Design and simulation of self-tuning PID-type fuzzy adaptive control for an expert HVAC system*. Expert Systems with Applications. 2009, pp.4566-4573.
- [9] FELSMANN, C.; et al; *Testing and validation of simulation tools of HVAC mechanical equipment including their control strategies. part ii: validation of cooling and heating coil models*. Eleventh International IBPSA Conference Glasgow, Scotland, 2009. pp.1115-1120.
- [10] MILLER, C.; SEKHAR, C.; *Modeling of the single coil, twin fan air-conditioning system in energy plus*. Fourth Nat. Conf. of IBPSA-USA, 2010. pp.201-206.
- [11] HOMOD, R.Z.; et al; *Hybrid PID-Cascade Control for HVAC System*. International Journal of Systems Control, 2010, pp. 170-175.
- [12] KELMAN, A.; BORRELLI, F.; *Bilinear model predictive control of a HVAC system using sequential quadratic programming*. Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy), 2011, pp.9869-9874.
- [13] THERESE, S.; *Simplified decoupled self-tuning fuzzy-pi controller for eliminating interaction in HVAC system*. Europ. Jour. Scient. Research 2012, pp.180-193.
- [14] HEIKURA, H.; Jun, Z.; *Energy saving of central air-conditioning and control system*, 2010. pp.52.